

05,08

Исследование распространения спиновых волн в системе гофрированный волновод—планарный волновод при изменении параметров модуляции

© В.А. Губанов, А.В. Кострикин, А.В. Садовников

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Саратов, Россия

E-mail: vladmeen@gmail.com

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Методом микромагнитного моделирования исследовано влияние параметра заполнения периода в латеральной системе планарный волновод/гофрированный волновод. Показаны режимы переключения распространения спиновых волн в выходные порты. При добавлении в систему дефектной области — области без периодичности — спектр прохождения изменяется, и появляются дополнительные частотные области пропускания волны. На основе полученных результатов возможно создание направленного ответвителя, применимого для устройств обработки информационных сигналов на принципах магноники.

Ключевые слова: спиновые волны, магноники, дефект, ферромагнетик, глубина канавок.

DOI: 10.21883/FTT.2023.07.55840.43H

1. Введение

В настоящее время большой интерес представляет создание базы комплементарных элементов межсоединений на принципах магноники [1] для реализации новых устройств обработки информационных сигналов. В роли переносчиков информации выступают спиновые волны (СВ) [2]. Высокая вариативность соединения элементарных магнитных блоков позволяют создавать целый ряд функциональных блоков [3].

Оптимальной средой для распространения СВ является ферромагнитная пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), которая отличается рекордно низким параметром затухания [4]. Пленки ЖИГ могут быть получены методами жидкофазной эпитаксии [5] либо техникой лазерного осаждения [6]. При этом минимальные значения толщин пленок, пригодные для распространения СВ, могут достигать десятков нанометров.

Управление спиновой волной возможно производить при помощи изменения таких параметров системы, как направлением и величиной внешнего магнитного поля, изменением частоты и мощности возбуждаемого в системе СВ-сигнала, а также введением в систему дополнительных управляющих параметров — приложения деформаций [7], наведением лазерного излучения [8], наложением на ферромагнитный волновод металлизированных поверхностей.

Также одним из вариантов управления параметрами СВ является создание неоднородного профиля волноведущей структуры. К примеру — создание периодических неоднородностей, образуя магнонные кристаллы (периодические условия изменения профиля вдоль толщины волноведущей структуры) или гофрированные

волноводы (периодические условия изменения профиля по ширине волновода) [9]. При этом в зависимости от геометрических параметров периода и частоты возбуждения спин-волнового сигнала будут возникать условия, при которых падающая и отраженные волны в области периодичности будут находиться в противофазе, приводящие к гашению распространения спиновых волн.

В настоящей работе будут рассмотрены с помощью метода микромагнитного моделирования режимы распространения СВ в системе связанных волноведущих структур, одним из которых является планарный волновод, а второй — гофрированный волновод без дефектной зоны и с дефектной зоной. Будут исследованы режимы перераспределения мощности СВ между выходными портами связанной структуры. Данная структура может использоваться как направленный ответвитель спин-волнового сигнала для создания устройств обработки СВЧ-сигнала на принципах магноники.

2. Исследуемые структуры и методика численного моделирования

Исследуемая структура представляет собой систему латерально связанных волноводов — планарный волновод и гофрированный волновод с одинаковой шириной (представлена на рис. 1, *a*) с параметрами для пленки ЖИГ: намагниченностью насыщения $M_0 = 139$ Г. В гофрированном волноводе создавалась область без периодичности, далее по тексту называемая дефектом, которая изображена на рис. 1, *b* и выделена оранжевым цветом. Длина дефектного сегмента составляла $l_{\text{def}} = 1000$ мкм.

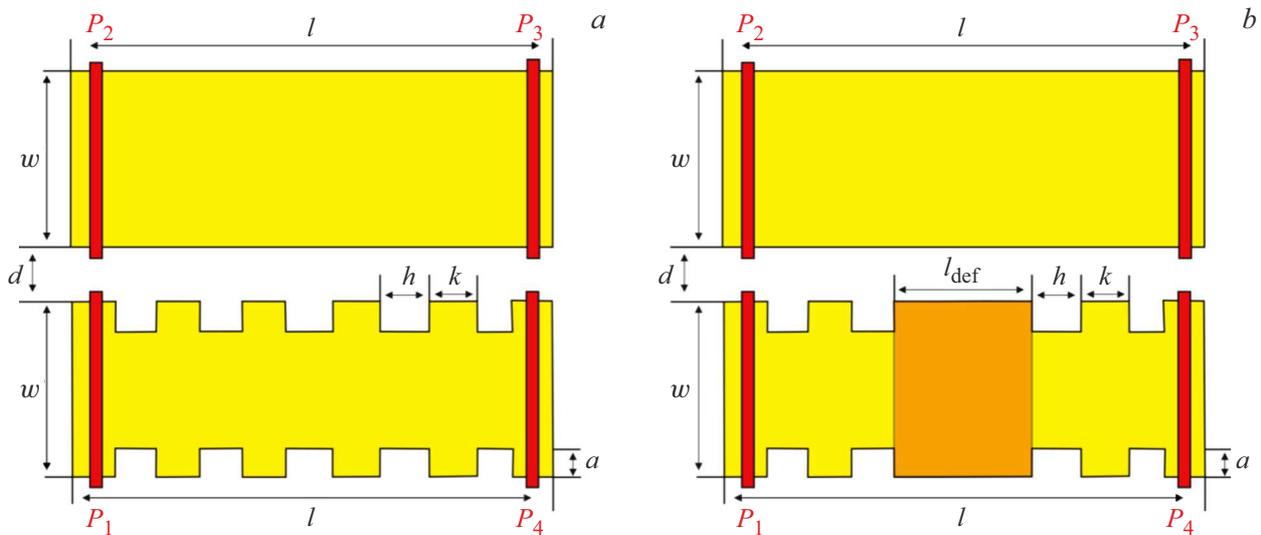


Рис. 1. Изображение исследуемой латеральной структуры планарный волновод/гофрированный волновод без добавления дефектной области (a) и при добавлении в область гофрированного волновода дефектной области (b).

Данные связанные волноводы имеет следующие параметры: длина структуры $l = 6000 \mu\text{m}$, ширина структуры $w = 500 \mu\text{m}$, глубина канавки a изменялась от 40 до $60 \mu\text{m}$, толщина волноводов составляла $t = 10 \mu\text{m}$. Волноведущие структуры располагались вдоль длинной оси волновода и расстояние между ними составляла $d = 15 \mu\text{m}$.

Для данной структуры производилась оптимизация параметра перекрытия $L = h + k$, где k — длина „гребня“ гофры, а h — длина канавки. В дальнейшем рассмотрении параметр перекрытия был равен $L = 160 \mu\text{m}$ ($h = 80 \mu\text{m}$, $k = 80 \mu\text{m}$).

В микромагнитном моделировании создавались условия для возбуждения поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), при котором внешнее магнитное поле H_0 величиной 1200 Oe прикладывалось вдоль оси y .

Рассматриваемая система волноведущих структур обладает 4 портами, которые располагались по всей ширине каждого из волноводов. Порт P_1 выступал в роли входного микрополоска, на которой возбуждалась спиновая волна. Порты P_2 , P_3 и P_4 выступали приемниками распространяющихся спиновых волн. Ширины данных антенн были равны $30 \mu\text{m}$.

Исследование проводилось в программном пакете MuMax³ [10], в котором моделируемая структура разбивалась сеткой $1024 \times 256 \times 1$ (D×Ш×Г), в узлах которой численно решалось уравнение Ландау–Лифшица с затуханием Гильберта [11,12]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{\text{eff}} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s(x,y)} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right], \quad (1)$$

где \mathbf{M} — вектор намагниченности, $\alpha = 10^{-5}$ — параметр затухания пленки ЖИГ, $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{\text{demag}} + \mathbf{H}_{\text{ex}} + \mathbf{H}_a$ — эффективное магнитное поле, \mathbf{H}_0 — внешнее магнитное

поле, $\mathbf{H}_{\text{demag}}$ — поле размагничивания, \mathbf{H}_{ex} — обменное поле, \mathbf{H}_a — поле анизотропии, $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$ — гиромангнитное отношение. Возбуждение спиновой волны производилось в следующем виде: $h_z(t) = h_0 \text{ sinc}(2\pi f t)$, где f — частота возбуждения спиновой волны, $h_0 = 0.1 \text{ Oe}$. Затем значение динамической намагниченности $m_z(x, y, t)$ в областях выходных антенн P_2 , P_3 , P_4 записывалось с шагом $\Delta t = 75 \text{ fs}$ в течении $t = 200 \text{ ns}$. И в дальнейшем по полученным данным проводились одномерные преобразования Фурье, в результате которых были получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) распространяющихся спиновых волн.

На рис. 2 представлены (АЧХ) для случаев параметра $a = 40 \mu\text{m}$ (рис. 2, a) и параметра $a = 60 \mu\text{m}$ (рис. 2, c) (без введения в систему дефектной области l_{def}) и для случаев параметра $a = 40 \mu\text{m}$ (рис. 2, b) и параметра $a = 60 \mu\text{m}$ (рис. 2, d) (при введении в систему дефектной области l_{def}). Для получения АЧХ в моделируемой структуре на входной порт P_1 (коричневая) подавался сигнал, а на выходных портах P_2 (зеленая линия), P_3 (синяя линия) и P_4 (красная линия) снимался.

Из данных АЧХ можно сделать вывод, что передаточные характеристики трансформируются, при которых наблюдается смещение частотных диапазонов с провалами. При этом только при изменении параметра глубины гофрированного волновода a с 40 до $60 \mu\text{m}$ в частотном диапазоне 5.22–5.3 GHz происходит перераспределение мощности спиновой волны в выходной порт P_3 в выходной порт P_4 .

Для случая введения дефектной области в гофрированной волноведущей структуре на АЧХ (рис. 2, b, d) при изменении параметра глубины гофрированного волновода a с 40 до $60 \mu\text{m}$ наблюдается уширение частотной области перестройки с $\Delta f = 80$ до 170 MHz (диапазон 5.21–5.38 GHz).

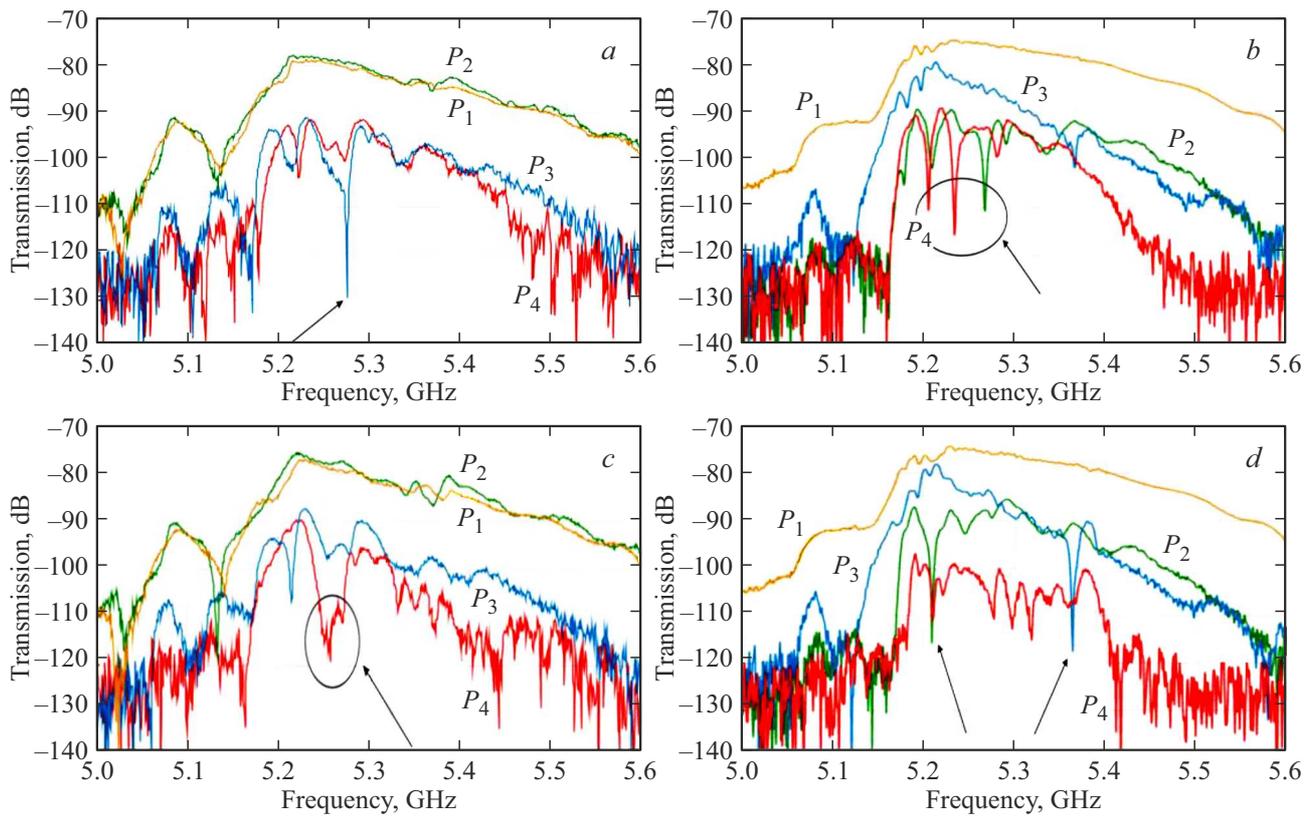


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики для случаев параметра $a = 40 \mu\text{m}$ (рис. 2,а) и параметра $a = 60 \mu\text{m}$ (рис. 2,с) без введения в систему дефектной области l_{def} и для случаев параметра $a = 40 \mu\text{m}$ (рис. 2,б) и параметра $a = 60 \mu\text{m}$ (рис. 2,д) при введении в систему дефектной области l_{def} . Для получения амплитудно-частотных характеристик в моделируемой структуре на входной порт P_1 (коричневая линия) подавался сигнал, а на выходных портах P_2 (зеленая линия), P_3 (синяя линия) и P_4 (красная линия) снимался.

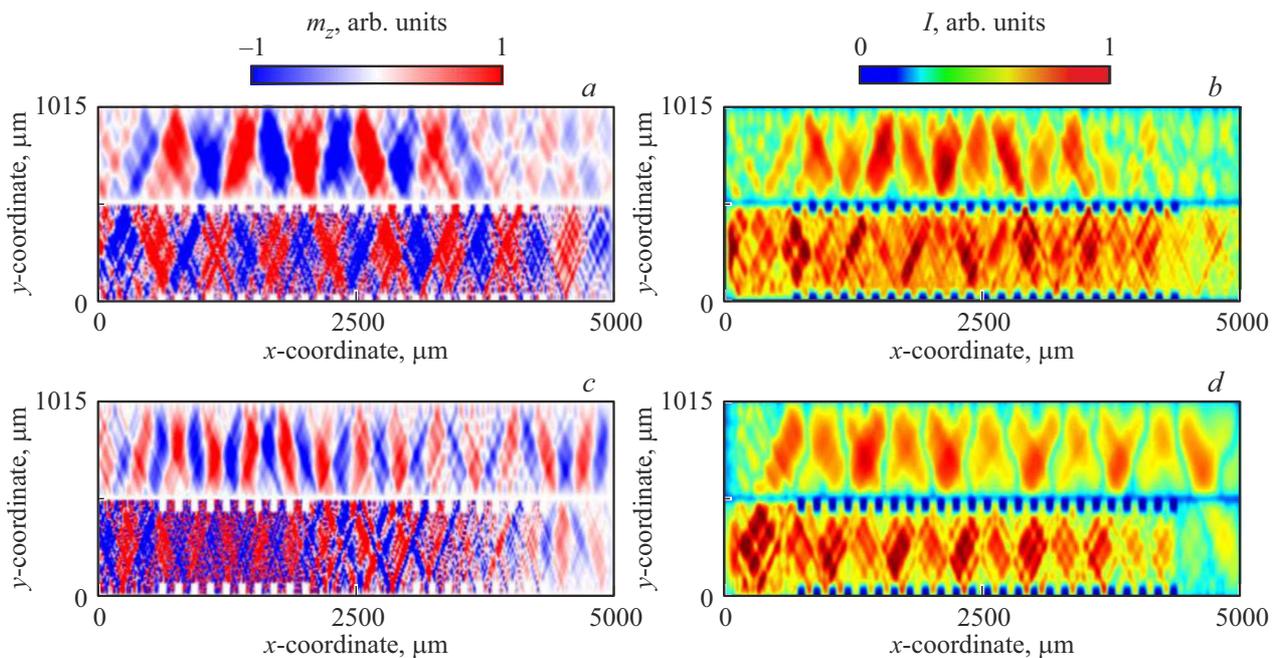


Рис. 3. Пространственные карты распределения m_z компоненты намагниченности и интенсивности СВ в системе без дефектной области на частоте $f = 5.28 \text{ GHz}$ (а, б) при параметре $a = 40 \mu\text{m}$ и на при параметре $a = 60 \mu\text{m}$ на частоте $f = 5.25 \text{ GHz}$ (с, д).

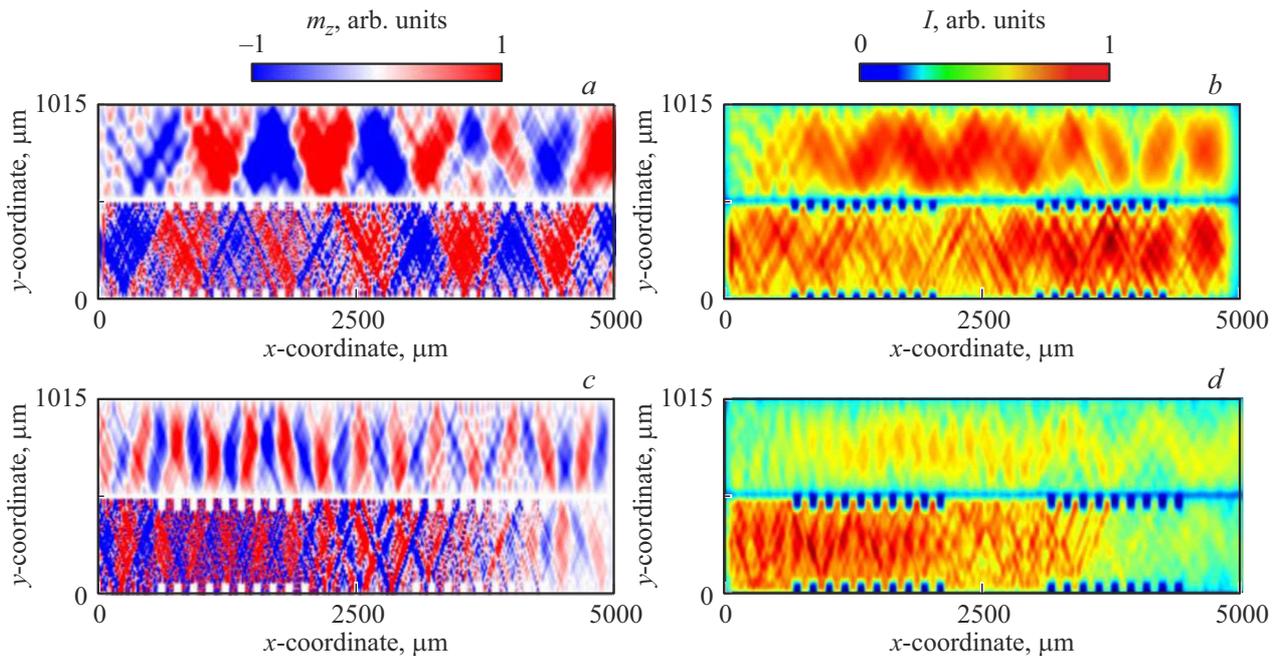


Рис. 4. Пространственные карты распределения m_z компоненты намагниченности и интенсивности СВ в системе с дефектной областью на частоте $f = 5.23$ GHz (*a, b*) при параметре $a = 40 \mu\text{m}$ и на при параметре $a = 60 \mu\text{m}$ на частоте $f = 5.36$ GHz (*c, d*).

Для наблюдаемых на АЧХ провалов при помощи микромагнитного моделирования были построены пространственные карты распределения m_z компоненты и интенсивности спиновых волн $I = \sqrt{m_z^2 + m_x^2}$ для рассмотренных случаев разного параметра a без добавления дефектной области (рис. 3) и при добавлении дефектной области (рис. 4).

На частоте $f = 5.28$ GHz (рис. 3, *a, b*) при параметре $a = 40 \mu\text{m}$ наблюдается режим, при котором спиновая волна перекачивается в планарный волновод и обратно перекачивается в гофрированный волновод. При этом в планарном волноводе возникают условия для распространения второй шириной моды спиновой волны.

При увеличении параметра a до $60 \mu\text{m}$ на частоте $f = 5.25$ GHz (рис. 3, *c, d*) реализуется режим переноса мощности спиновой волны и вывода через выходной порт P_3 .

При введении в гофрированный волновод области дефекта при построении карт распределения m_z компоненты и интенсивности спиновой волны на частоте, характерной для провала, может реализоваться режим, при котором спиновая волна перераспределяется между выходными портами P_3 и P_4 (рис. 4, *a, b*) на частоте 5.23 GHz, либо перестает распространяться (рис. 4, *c, d*) на частоте 5.36 GHz, создавая условия для отражения СВ от границы дефекта.

3. Заключение

Таким образом, с помощью численного моделирования была исследована связанная структура планарный

волновод—гофрированный волновод. Были построены передаточные характеристики и пространственные карты распределения m_z — компоненты намагниченности и интенсивности спиновой волны, демонстрирующие режимы перераспределения мощности СВ. При добавлении в гофрированный волновод дефектной области без периодичности, в системе возникают дополнительные частоты для перенаправления мощности СВ. Данная структура может быть использована как направленный ответчик СВЧ-сигнала для создания устройств обработки информационных сигналов на принципах магнетики.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2023-0008).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.A. Nikitov, D.V. Kalyabin, I.V. Lisenkov, A.N. Slavin, Y.N. Barabanenkov, S.A. Osokin, A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, M.A. Morozova, Y.P. Sharaevsky, Y.A. Filimonov, Y.V. Khivintsev, S.L. Vysotsky, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov. Phys.-Usp. **58**, 1002 (2015).
- [2] V. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S. Demokritov. Phys. Rep. **673**, 1 (2017).

- [3] C.S. Davies, A.V. Sadovnikov, S.V. Grishin, Y.P.Sharaevsky, S.A. Nikitov, V.V. Kruglyak. IEEE Transact. Magn. **51**, 1 (2015).
- [4] V. Cherepanov, I. Kolokolov, V. Lvov. Phys. Rep. **229**, 81 (1993).
- [5] C. Dubs, O. Surzhenko, R. Thomas, J. Osten, T. Schneider, K. Lenz, J. Grenzer, R. Hübner, E. Wendler. Phys. Rev. Mater. **4**, 024416 (2020).
- [6] L.V. Lutsev, A.M. Korovin, S.M. Suturin, L.S. Vlasenko, M.P. Volkov, N.S. Sokolov. J. Phys. D **53**, 265003 (2020).
- [7] V. Sadovnikov, A.A. Grachev, S.E. Sheshukova, Y.P. Sharaevskii, A.A. Serdobintsev, D.M. Mitin, S. A.Nikitov. Phys. Rev. Lett. **120**, 257203 (2018).
- [8] M. Vogel, A.V. Chumak, E.H. Waller, T. Langner, V.I. Vasyuchka, B. Hillebrands, G. von Freymann. Nature Phys. **11**, 487 (2015).
- [9] S. Nikitov, P. Tailhades, C. Tsai. J. Magn. Magn. Mater. **236**, 320 (2001).
- [10] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B.V. Waeyenberge. AIP Adv. **4**, 107133(2014)
- [11] L. Landau, E. Lifshitz. Phys. Z Sowj **8**, 153 (1935).
- [12] T.L. Gilbert, J.M. Kelly. American Institute of Electrical Engineers **253–263** (1955).

Редактор Т.Н. Василевская